

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta  
Ústav Geologie a Paleontologie**

**Charles University in Prague, Faculty of Science  
Institute of Geology and Paleontology**

Doktorský studijní program: geologie  
Ph.D. study program: geology

Autoreferát disertační práce  
Summary of the Ph.D. thesis



**Magnetic fabric, magma flow and tectonic deformation in  
volcano–plutonic systems**

**Magnetická stavba, tok magmatu a tektonická deformace ve  
vulkano–plutonických systémech**

Filip Tomek

Školitel/Supervisor: Jiří Žák

Praha, 2015

## ABSTRACT

This Ph.D. thesis aims to investigate dynamics of emplacement and tectonic history of selected volcano–plutonic complexes in a continental magmatic arc and back arc setting. The thesis presents new data sets from five field areas, presented in separate chapters, which could be viewed as representing a vertical sections through upper part of an intermediate to felsic magmatic system. From top to bottom in this 'imaginary' vertical system, the examined units are: (1) andesitic lava domes and (2) sub-volcanic magma chambers (<3 km deep) of the Miocene Štiavnica volcano–plutonic complex, Western Carpathians (Slovakia), (3) Shellenbarger pluton (<3 km depth) within the mid-Cretaceous Minarets caldera, Sierra Nevada batholith in California (USA), and ~7–10 km deep granitoids of (4) Lower-Cretaceous Wallowa batholith, Blue Mountains province in Oregon (USA) and (5) Late Devonian Staré Sedlo complex, central Bohemian Massif (Czech Republic). The research incorporates extensive field and structural data, supported by analysis of igneous textures and anisotropy of magnetic susceptibility (AMS). The latter is further accompanied by detailed examination of magnetic mineralogy using thermomagnetic measurements and optical and back scattered diffraction microscopy. In addition, the third chapter contains U–Th–Pb radiometric dating obtained by laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry (LA–ICP–MS).

The key results of each of these case studies are as follows. (1) Different fabric patterns of the Štiavnica lava domes and their spatial and temporal association with collapse caldera suggest that the dome growth was controlled by caldera floor subsidence. It is inferred that each dome reflects snapshots of a continuous succession of various modes of caldera collapse from piston through trap-door to piecemeal. (2) Magnetic fabric study of the Štiavnica sub-volcanic plutons revealed contrasting mechanisms of their construction. A diorite pluton represents a steep sided-stock whereas the granodiorite was emplaced in two stages. First, a thin sill intruded along a subhorizontal basement/cover detachment, followed by piecemeal subsidence of the fractured pluton floor due to magma overpressure. (3) The Minarets caldera developed by two Plinian eruptions marked by voluminous deposits of ash-flow tuffs and caldera collapse represented by collapse mega-breccia. The whole sequence was then deformed along a ductile transpressive shear zone and intruded by resurgent Shellenbarger granite pluton within the caldera interior. Magmatic fabrics in the pluton record regional dextral transpression interpreted in terms of oblique convergence of lithospheric plates. (4) Multiple magmatic fabrics in three granodioritic to tonalitic plutons of the Wallowa batholith are interpreted as emplaced syn-tectonically and reflecting progressive deformation during oceanic terrane/continent collision and oroclinal bending in the Blue Mountains Province. (5) Coupled host-rock and magmatic to solid state fabrics of the Staré Sedlo granitoids suggest transtensional deformation which operated prior to, during, and after its emplacement. This syn-convergent transtension is an enigmatic deformation event that occurred during onset of the Variscan Orogeny in the central Bohemian Massif.

In summary, this Ph.D. thesis shows that preexisting environment and active faulting of volcano–plutonic systems may largely control emplacement of volcanic and plutonic rocks as exemplified by the dynamics of growth and construction of lava domes and subvolcanic magma chambers. Furthermore, as opposed to theoretical models, it has been demonstrated that even very shallow-level small-scale intrusions are able to record subtle tectonic strains still in magmatic state. Although the fabrics in plutons preserve only one short snapshot of the inferred instantaneous strain, detailed analysis of syntectonic plutons characterized by hypersolidus fabrics together with precise radiometric dating could unravel complex deformation histories at regional scale over a long period of time. Finally, it has been proposed that pluton fabrics may be used to decipher kinematics of lithospheric plate convergence or divergence and changes in their past relative motions.

## ABSTRAKT

Cílem této doktorské práce je výzkum dynamiky vmístění a historie tektonické deformace ve vybraných vulkano–plutonických komplexech v prostředí kontinentálních magmatických oblouků a zaobloukových oblastí. Práce prezentuje nová data z pěti terénních případových studií, které mohou být považovány za vertikální řezu svrchní části intermediárního až felziického magmatického systému. Zkoumané jednotky tohoto pomyslného systému představují samostatné kapitoly a od povrchu do hloubky zahrnují: (1) andesitové lávové dómy a (2) sub-vulkanické magmatické komory (hloubka <3 km) z miocenního štiavnického vulkano–plutonického komplexu v Západních Karpatech (Slovensko), (3) Shellenbarger pluton (hloubka <3 km) uvnitř středně-křídové Minarets kaldery, Sierra Nevada batolit v Kalifornii (USA); a ~7–10 km hluboké granitoidy (4) spodně-křídového Wallowa batolitu, provincie Blue Mountains v Oregonu (USA) a (5) svrchně-devonský starosedelský komplex v centrální část Českého masívu (Česká republika). Samotný výzkum zahrnuje rozsáhlá terénní a strukturní data, která jsou podpořena analýzou magmatických textur a anizotropie magnetické susceptibility (AMS), která je dále doplněna o podrobnou analýzu magnetické mineralogie pomocí termomagnetického měření a optické a elektronové mikroskopie. Třetí kapitola dále také obsahuje U-Th-Pb radiometrické datování metodou laserové ablace-indukčně vázané plazmy, hmotnostní spektrometrie (LA-ICP-MS).

Klíčové výsledky z každé případové studie jsou následující: (1) Magmatické stavby ve štiavnických lávových dómech a jejich prostorová a časová spojitost s kolapsem kaldery naznačují, že růst dómů byl kontrolován subsidencí kalderového dna. Proto je uvažováno, že každý dóm zaznamenává krátké momenty jednotlivých módů kontinuálního vývoje kaldery od 'piston' přes 'trap-door' po 'piecemeal' kolaps. (2) Studium magnetických staveb štiavnických subvulkanických plutonů odhalilo odlišné mechanismy jejich konstrukce. Dioritový pluton představuje vertikálně uložený peň, zatímco granodiorit byl vmístěn jako tabulární pluton ve dvou etapách. Za prvé, tenká ložní žíla intrudovala podél hlavního subhorizontálního rozhraní mezi geologickým podkladem a překryvem, což bylo následováno postupným poklesem frakturovaného dna plutonu ('piecemeal floor subsidence') v důsledku přetlaku magmatu. (3) Vývoj Minarets kaldery indikuje dvě plinijské erupce, doložené mocnými uloženinami ignimbritových proudů následované kolapsem kaldery a vmístěním kolapsové megabrekcie. Celá sekvence pak byla deformována podél duktilní transpresní sřizné zóny a intrudována mělkým, resurgentním granitovým plutonem Shellenbarger. Magmatické stavby v plutonu dále zaznamenávají regionální pravostrannou transpresi, která je interpretována jako důsledek šikmé konvergence litosférických desek. (4) Různý charakter magmatických staveb ve třech granodioritových až tonalitových plutonech Wallowa batolitu indikuje syntektonického vmístění, které značí progresivní deformaci během kolize oceánských a kontinentálních teránů a oroklinálního ohýbání v provincii Blue Mountains. (5) Metamorfní stavby v okolních horninách a magmatické až subsolidové stavby granitoidů starosedelského komplexu odhalily syn-konvergentní transtenzní deformaci, která byla pravděpodobně aktivní před, v průběhu i po vmístění granitoidů. Tato transtenze je prozatím záhadný event, který se odehrál během nástupu variské orogeneze v centrální Českého masívu.

Širší implikace této doktorské práce ukazují, že pre-existující geologické prostředí vulkano–plutonických systémů, jeho struktury a aktivní deformace na zlomech může do značné míry kontrolovat vmístění vulkanických a plutonických hornin, jako například dynamiku růstu a konstrukce lávových dómů a subvulkanických lávových komor. Dále, na rozdíl od teoretických modelů, bylo prokázáno, že i velmi mělké intruze malého rozsahu jsou schopny zaznamenávat tektonickou deformaci v magmatických stavu. Přestože magmatické stavby v plutonech zachovávají pouze jeden krátký přírůstek okamžité deformace, podrobná analýza magmatických staveb syntektonických plutonů spolu s přesným radiometrickým datováním může odhalit složité deformační historie na regionální úrovni po dlouhé časové úseky. Závěrem, je ukázáno, že magmatické stavby v plutonech mohou být použity k dešifrování kinematiky deskové konvergence nebo divergence a změn v jejich relativních pohybech.

## INTRODUCTION

### Magmatic systems in continental magmatic arcs

Intermediate to felsic volcanoes and underlying plutons (former magma chambers) in continental magmatic arcs are in fact end products of vertically extensive (from the lithospheric mantle to the uppermost crust) magmatic systems. The arcs grow as a result of protracted subduction of oceanic plates beneath the continental lithosphere (e.g., DeCelles et al., 2015, 2009; Ducea and Barton, 2007; Paterson and Ducea, 2015; Tatsumi and Kogiso, 2003; Tatsumi, 2005). Herein, magma is has intermediate compositions and is typically a product of mixing of mantle- and crustally-derived melts. The former is commonly generated from fractional crystallization of mantle-derived basalts (e.g., Annen et al., 2006) whereas the latter by partial melting of middle to lower crustal metasediments and amphibolites (e.g., Brown, 2013, 2007, 1994; Milord et al., 2001; Petford et al., 2000). The segregated buoyant magma then ascends through the crust (e.g., Cartwright and Hansen, 2006; Clemens and Mawer, 1992; Petford et al., 1993; Vigneresse and Clemens, 2000), where it may stall to form large reservoirs (e.g., Collins and Sawyer, 1996; Crawford et al., 1999; Miller and Paterson, 2001) before final high-level emplacement and/or eventually eruption (e.g., Acocella and Funicello, 2010; Bachmann and Bergantz, 2008, 2004; Bachmann et al., 2007; Lipman, 1984; Lipman and Bachmann, 2015). In addition, the active continental margins are sites of high tectonic stress accumulation resulting from plate convergence. The tectonic stresses thus significantly influence the whole dynamics of magmatic arcs. Consequently, it is inferred that the tectonic stresses in arcs also facilitate magma ascent and may also control pluton emplacement and volcanic processes at the Earth's surface (e.g., Brown and Solar, 1998; D'Lemos et al., 1992; Rosenberg, 2004; Vigneresse, 1995a, 1995b).

### Internal fabrics in volcanic and plutonic rocks

It has been well established that the structural inventory volcanic and plutonic rocks provides 'archives' of mechanical processes during lava and magma flow, emplacement, and of strain regimes recording tectonic deformation at the lithospheric scale (e.g., Pitcher and Berger, 1972; Cañón-Tapia et al., 1996, 1997; Paterson et al., 1998; Petford et al., 2000; Vernon, 2000; Petford, 2003; Benn et al., 2001; Benn, 2004; Féménias et al., 2004; Vernon and Paterson, 2006; Cao et al., 2015). These processes are generally interpreted from three-dimensional shapes of volcanic and plutonic bodies, characteristics of intrusive contacts, and internal structures such as magmatic fabrics.

Magmatic fabrics represented by foliation and lineation are defined as planar and linear shape-preferred alignment of mineral grains, aggregates, and/or microgranular enclaves, respectively (e.g., Paterson et al., 1998, 1989; Vernon et al., 2004; Vernon, 2000). Macroscopic fabrics are measured directly in the field and plotted to maps and can be further analyzed in thin-sections or using some other quantitative methods such as electron back scattered diffraction (EBSD) or computer-integrated polarization (CIP). As opposed to coarser-grained foliated plutons, volcanic rocks are commonly

fine-grained and even aphyric with no apparent magmatic fabric. To obtain the internal fabrics in quasi-isotropic volcanic and also plutonic rock, the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS; Hrouda, 1982; Tarling and Hrouda, 1993; Borradaile and Jackson, 2004, 2010) is often used as a sensitive tool capable of detecting even the weakest, macroscopically invisible fabrics.

## What can magmatic fabrics tell us?

Magmatic fabrics are those formed in melt-present hypersolidus state. A foliation is perpendicular to the maximum shortening, indicating  $z_i$ -axis of the instantaneous strain ellipsoid, and a lineation reflects the maximum stretching direction, which is parallel to the  $x_i$ -axis of the instantaneous strain ellipsoid (e.g., Hutton, 1988; Paterson et al., 1998). In many cases, magmatic fabrics are interpreted as recording last increments of strain during magma solidification, when the near solidus crystal mushes become rigid crystal–melt frameworks wherein the magma cannot move anymore. Hence, fabrics are rather poor recorders of the total strain history experienced by the flowing magma and instead they likely record only a ‘frozen-in snapshot’ of strain just before immediate solidification. So, what kind of processes are actually archived in igneous rocks?

In volcanic bodies (e.g., lava flow, domes, and pyroclastic deposits), fabrics are commonly associated with local lava flow end emplacement of individual parts of the volcanic edifice (e.g., Palmer et al., 1996; Ort et al., 2003, 2015; Looock et al., 2008; Petronis et al., 2013). Similarly, very shallow, small-scale plutons with fast cooling rates are inferred only to record magma flow during pluton construction as such plutons are not expected to interact with slower tectonic processes due to their rapid cooling. Hence, their construction rates are supposed to be orders of magnitude faster than regional tectonic strains. To the contrary, large-scale batholiths, which are constructed by amalgamation of several magma pulses over longer periods of time, should have comparable rates of emplacement and tectonic deformation (e.g., de Saint Blanquat et al., 2011), and thus in many cases represent excellent markers of tectonic strain.

In addition, a great challenge arises when interpreting magma flow and emplacement from magnetic fabric due to possible complexities of magnetic mineralogy. For instance, the tiny microscopic crystals (susceptibility carriers) can still rotate within the interstitial melt, whereas the surrounding crystal-rich mush is already locked, unable to move. This may cause discrepancies between magmatic and magnetic fabrics, caused by some later most likely subtle change in strain regime. Furthermore, the ferromagnetic minerals can define inverse fabric, be altered, or new magnetite may grow after the emplacement affecting the primary AMS fabric. Last but not least, the heat from magma induces hydrothermal fluid circulation, which in turn can significantly influence the AMS fabric.

## **AIMS AND GOALS OF THE THESIS**

Several outstanding and yet unsolved issues thus arise when studying fabric record in arc volcano–plutonic systems, which may indicate anything from local magma flow to regional tectonic deformation. The ambition of this thesis is to discuss and address the following issues:

- Can magmatic fabrics in volcanic rocks reveal mechanisms of flow and growth of various lava formations (e.g. flows, domes, necks, spines, and tuffs). What is the role of preexisting structures, active faulting, or caldera collapses during volcanic activity? Is it possible that these structures influence the emplacement of lavas, and can this be deduced from fabrics in the volcanic edifice?
- What are the mechanisms of construction and associated magma flow paths and strain patterns in shallow magma chambers beneath large volcanoes, and are they comparable to deeper plutons?
- Do the small very shallow intrusions such as sills, dikes, laccoliths, and sub-volcanic plutons really record only emplacement-related strain, or could they also record paleostain fields still in magmatic state?
- How does magma interact in the upper continental crust with various tectonic regimes such as transtension, transpression, block rotations, and what can we learn from it?
- On the largest scale, is it possible to determine plate motion vectors and associated paleodeformation fields from strain recorded in high-level intrusions?

## **FIELD AREAS**

The above issues were addressed on four volcano–plutonic complexes in continental arc and back arc setting. Together, these case studies can be considered as representing a vertical section through a magmatic system from surface lava domes to deeper plutons. As each chapter of the thesis contains detailed information about local geological setting, here I will only briefly introduce the study areas.

(1) The first two chapters deal with lava domes and subvolcanic magma chambers of the Štiavnica volcano-plutonic complex of Neogene to Quaternary Carpathian–Pannonian Region, Western Carpathians. This complex is an erosional relic of a Miocene caldera-stratovolcano formed in an extensional back-arc setting inboard of a flysch belt and oceanic domains subducted underneath the outer Carpathian arc (Konečný et al. 1995, 2002; Lexa et al., 1999; Harangi et al. 2007; Chernyshev et al., 2013). The significant vertical relief exposes nearly complete vertical section from volcano basement, through subvolcanic intrusions and ring-fault to overlying volcanic deposits, which provides unique insights into dynamics of magma flow, emplacement, and eruption of large composite volcanoes.

(2) The mid-Cretaceous Minarets caldera discussed in Chapter 3 is a volcano–plutonic complex preserved in the roof of the Cenozoic Sierra Nevada batholith of the North American Cordillera in California (Fiske and Tobisch, 1994). The complex

exposes regionally deformed syn- to post-caldera volcanic products and associated <3 km deep resurgent Shellenbarger pluton, allowing a complex study of presumably simultaneous volcanic and tectonic processes.

(3) Chapter 4 examines plutons and their host rock of the Early Cretaceous Wallowa batholith in the Blue Mountains Province, which is also part of the North American Cordillera but in northeastern Oregon (e.g., Johnson et al., 2011). The batholith was emplaced into the Blue Mountains orocline approximately at the time of collision of the Blue Mountains oceanic terranes with the North American craton. The Wallowa batholith is here examined to reveal transpressional deformation, kinematics, and temporal relations of shallow-level plutonism to the terrane/continent collisions and to oroclinal bending.

(4) Research in the Late Devonian Staré Sedlo complex, central Bohemian Massif, is presented in the last chapter. The complex comprises deformed granodiorite to tonalite of supra-subduction calc-alkaline origin in the roof of a large magmatic arc emplaced along a boundary between two lithospheric units in the Bohemian Massif (e.g., Košler et al., 1993; Janoušek et al., 2000). The structural analysis of this complex was used as a basis for discussion of interplay between emplacement processes and tectonic (transtensional) deformation of deeper-seated granitic magmas.

## **METHODOLOGY**

The thesis is divided into three sections. Introduction outlines principal goals of the thesis and motivation for the research and briefly summarizes current state of knowledge. The main body of the thesis then includes five chapters, three of which are based on papers already published in international peer reviewed journals (enclosed in the Appendix), and the two other chapters are papers currently under review. The last section (Summary) highlights the most important results of the thesis.

The research in all study areas was based on a combination of multiple methods including field and structural mapping, which served as a basis for targeted sampling of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS; Hrouda, 1982; Tarling and Hrouda, 1993; Borradaile and Jackson, 2004, 2010). The AMS was measured in the Laboratory of Rock Magnetism at the Institute of Geology and Paleontology and was complemented with detailed analysis of magnetic mineralogy. In addition, a large number of thin-sections were examined using optical and back scattered diffraction microscopy in order to precisely characterize volcanic and plutonic textures, the degree of their tectonic deformation, and mineral assemblages. Last but not least, the chapter three contains U–Th–Pb radiometric dating using laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry (LA–ICP–MS) obtained at the University of Bergen.

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

### Specific studies: magma emplacement dynamics in shallow volcano–plutonic systems

In the Miocene Štiavnica volcano–plutonic complex, complex fabric patterns of three lava domes (Domes 1–3) and shallow plutons (diorite and granodiorite) were interpreted as recording magma flow paths and strain patterns during lava dome growth and magma chamber construction.

(1) Spatial and temporal association of collapse caldera and the andesite lava domes emplaced along a ring-fault suggest that the dome growth was controlled by caldera floor subsidence. Dome 1 is characterized as a lava coulee which flowed down the hinged floor of a trap-door caldera. Dome 2 represents a single elongated, ring-fault-parallel dome with short lava outflow emplaced on a flat floor during piston collapse. Dome 3 was fed by multiple linear fissures at a high angle to the ring fault in the collapsing caldera floor and was later intruded by ring-fault-parallel dikes representing potential feeders for younger lava domes and flows. It is inferred that each dome reflects snapshots of a continuous succession of various modes of caldera collapse from piston (Dome 2) through trap-door (Dome 1) to piecemeal (Dome 1).

(2) Magnetic fabric study of two deeper, sub-volcanic diorite and granodiorite plutons revealed contrasting mechanisms of their construction. The diorite was emplaced as a steep-sided ~WNW–ESE elongated stock. The voluminous granodiorite has a 'layered' architecture and was presumably emplaced in two stages. First, an upper 'layer' was emplaced as a thin sill along a major sub-horizontal basement/cover detachment followed subsidence of the pluton floor along ~NNE–SSW to ~NE–SW faults. This process created space for a lower 'layer' causing thickening the original sill into a tabular pluton. Based on this case example, various models for magma flow and resulting fabrics during various modes of pluton floor subsidence were developed.

### Specific studies: arc volcanism, plutonism, and tectonic deformation

(1) The mid-Cretaceous Minarets caldera of the Sierra Nevada magmatic arc greatly exemplifies complex interactions between volcanism, plutonism and tectonic deformation. The original volcanic edifice was built by Plinian ash-flow tuff eruptions followed by caldera collapse marked by deposition of collapse mega-breccia and post collapse ash-flow tuff. The whole sequence was then deformed along a ductile transpressive shear zone and intruded by very shallow, resurgent Shellenbarger granite pluton within the caldera interior.

Magmatic and metamorphic fabrics in the pluton and its aureole, respectively record regional dextral transpressional deformation. The same deformation has been documented in several other Late Cretaceous syntectonic plutons of the Sierra Nevada indicating two principal stretching directions: near-vertical magmatic stretching in ~102–86 Ma plutons and subhorizontal late magmatic to subsolidus stretching in ~87–86 Ma plutons. It was inferred that the rotation of the principal stretching direction at



around 87–86 Ma reflects a continuous change in plate kinematics and resulting arc deformation from pure shear-dominated to wrench-dominated dextral transpression suggesting increased obliquity of converging Farallon and North American plates.

(2) In the Wallowa batholith, northeastern Oregon, host-rock structures and multiple magmatic to solid state fabrics in the Pole Bridge, Hurricane Divide, and Craig Mountain plutons record three phases of progressive regional deformation in the Wallowa terrane during Early Cretaceous times (~140–126 Ma). The fabrics indicate early ~NE–SW terrane-oblique principal shortening recording attachment of the Blue Mountains superterrane to the North American continental. This deformation switched to ~NNE–SSW shortening associated with vertical stretching related to the continued impingement of the superterrane into the North American margin at around 135–128 Ma. The northern portion of the superterrane became 'locked' and difficult to further deform. The 'lock-up' impingement of superterrane led to reorientation of the principal shortening direction to ~NNW–SSE and the still deformable southern portion of the superterrane rotated clockwise about vertical axis at around 126 Ma.

(3) In the Late Devonian Staré Sedlo complex, central Bohemian Massif, granodiorites to tonalites were emplaced as a subhorizontal sheeted sill complex into an active transtension zone. This deformation is evidenced by subhorizontal magmatic to solid state foliations and NE–SW stretching lineations associated with overall prolate shapes of fabric ellipsoid and concordant metamorphic fabrics in their host-rock. The magma/host rock system in transtension evolved from initial crack tip propagation by magma wedging and vertical expansion due to new magma additions through stable conduit flow to final vertical collapse after the magma input ceased. Finally, the sill emplacement and subsequent deformation of the granitoids were interpreted as recording syn-convergent, early orogenic sinistral transtension along the rear side of an upward and laterally extruded upper-crustal wedge as represented by the Teplá–Barrandian unit.

## General implications

The thesis has documented how tectonic inheritance (faults, detachment zones) and active faulting (caldera collapse) in volcano–plutonic systems may control emplacement of volcanic and plutonic rocks as exemplified by the dynamics of growth and construction of lava domes and subvolcanic magma chambers. Furthermore, as opposed to theoretical models, it has been demonstrated that even very shallow-level small-scale intrusions are capable of recording even subtle tectonic strains still in magmatic state. Although fabrics in plutons preserve only a snapshot of the total strain, detailed analysis of syntectonic plutons with developed hypersolidus fabrics together with precise radiometric dating is a powerful tool in unraveling complex deformation histories (transpression, transtension, crustal-scale folding, and lithospheric block rotations) at regional scale over a long period of time. Finally, it has been proposed that pluton fabrics may be used to decipher kinematics of lithospheric plate convergence or divergence and changes in their past relative motions.

## Úvod

### Magmatické systémy v kontinentálních magmatických obloucích

Intermediární až felzické vulkány a podložní plutony (utuhnuté magmatické komory) v kontinentálních magmatických obloucích jsou ve skutečnosti finální produkty vertikálně rozsáhlých (od litosférického pláště až po nejsvrchnější kůra) magmatických systémů. Oblouky jsou konstruovány v důsledku dlouhodobé subdukce oceánských desek pod kontinentální litosféru (např. DeCelles et al., 2015, 2009; Ducea and Barton, 2007; Paterson and Ducea, 2015; Tatsumi and Kogiso, 2003; Tatsumi, 2005). Typické magma kontinentálního oblouku má intermediární složení a je produktem mixingu plášťových a korových tavenin. Plášťová tavenina je generována frakční krystalizací plášťových bazaltů (např. Annen et al., 2006), zatímco korová tavenina parciálním tavením spodně až středně korových metasedimentů a amfibolitů (např. Brown, 2013, 2007, 1994; Milord et al., 2001; Petford et al., 2000). Taková tavenina pak stoupá kůrou (např. Cartwright and Hansen, 2006; Clemens and Mawer, 1992; Petford et al., 1993; Vigneresse and Clemens, 2000), kde se může zastavit a formovat velké magmatické rezervoáry (např. Collins and Sawyer, 1996; Crawford et al., 1999; Miller and Paterson, 2001) před finálním vmístěním v nejsvrchnější kůře a případné vulkanické erupci (např. Acocella and Funicello, 2010; Bachmann and Bergantz, 2008, 2004; Bachmann et al., 2007; Lipman, 1984; Lipman and Bachmann, 2015). Aktivní kontinentální okraje dále představují místa s vysokou akumulací tektonického napětí, která pramení z konvergence litosférických desek. Tektonické napětí tudíž významně ovlivňuje dynamiku magmatických oblouků. Z toho důvodu je předpokládáno, že tektonické napětí usnadňuje výstup magmatu v magmatických obloucích a může také ovlivňovat vmístění plutonů a vulkanické procesy na zemském povrchu (např. Brown and Solar, 1998; D’Lemos et al., 1992; Rosenberg, 2004; Vigneresse, 1995a, 1995b).

### Vnitřní stavby vulkanických a plutonických hornin

Bylo prokázáno, že strukturní inventář vulkanických a plutonických hornin poskytuje velmi dobré záznamy o mechanických procesech během toku lávy, vmístění magmatu a deformačních režimech zaznamenávající tektonickou deformaci v litosférickém měřítku (např. Pitcher and Berger, 1972; Cañón-Tapia et al., 1996, 1997; Paterson et al., 1998; Petford et al., 2000; Vernon, 2000; Petford, 2003; Benn et al., 2001; Benn, 2004; Féménias et al., 2004; Vernon and Paterson, 2006; Cao et al., 2015). Tyto procesy jsou obvykle interpretovány z trojrozměrných tvarů vulkanických a plutonických těles, charakteru intruzivních kontaktů a vnitřních struktur, jako jsou například magmatické stavby.

Magmatické stavby, reprezentované foliací a lineací, jsou definovány jako planární a lineární přednostní tvarová orientace minerálních zrn, agregátů a/nebo mikrogranulárních enkláv, respektive (např. Paterson et al., 1998, 1989; Vernon, 2000; Vernon et al., 2004). Makroskopické stavby jsou v terénu měřeny přímo a jsou vynášeny do geologických map. Dále mohou být analyzovány ve výbrusech nebo pomocí některé z dalších kvantitativních metod, jako například difrakce zpětně

odražených elektronů (EBSD) nebo počítačově integrované polarizace (CIP). Na rozdíl od hrubě zrnitých foliovaných plutonů, vulkanické horniny jsou běžně jemnozrné a dokonce i afyrické bez makroskopicky zjevné magmatické stavby. Pro získání informací o vnitřní stavbě v kvazi-izotropních vulkanických a plutonických horninách se často používá metoda anizotropie magnetické susceptibility (AMS; Hrouda, 1982; Tarling and Hrouda, 1993; Borradaile and Jackson, 2004, 2010), jako citlivý nástroj schopný detekovat i nejslabší, makroskopicky neviditelné stavby.

## Co nám mohou magmatické stavby prozradit?

Magmatické stavby jsou ty, které vznikají v přítomnosti taveniny (v hypersolidovém stavu). Plocha foliace je kolmá na okamžité maximální zkrácení, což indikuje  $z_1$  osu deformačního elipsoidu, a lineace odráží směr okamžitého maximálního roztahení, které je rovnoběžné s  $x_1$  osou deformačního elipsoidu (např. Hutton, 1988; Paterson et al., 1998). V mnoha případech jsou magmatické stavby interpretovány jako záznam posledního přírůstku deformace během tuhnutí magmatu, kdy se z kaše krystalů a magmatu stane propojená síť krystalů uzavírající zbytkovou taveninu neschopnou dalšího pohybu. Z tohoto důvodu magmatické stavby hůře zaznamenávají celkovou deformační historii proudícího magmatu, ale spíše ukazují pouze krátké momentky deformace zamrznuté těsně před utužením. Takže, jaké druhy procesů jsou ve skutečnosti archivovány ve vyvřelých horninách?

Ve vulkanických tělesech (např. lávové proudy, dómy, pyroklastické uložení), jsou magmatické stavby běžně spojovány s tokem lávy v lokálním měřítku a vmístěním jednotlivých částí vulkánů (např. Palmer et al., 1996; Ort et al., 2003, 2015; Looock et al., 2008; Petronis et al., 2013). Podobně, velmi mělké intruze malého měřítka vyznačující se rychlým chladnutím, by měly zaznamenávat pouze tok magmatu během konstrukce plutonu, protože takové plutony by neměly mít dostatek času na interakci s tektonickou deformací, která je o několik řádů pomalejší. Na druhou stranu, velké batolity, které jsou konstruovány amalgamací vícero magmatických pulzů během dlouhých časových period, by měly vykazovat podobné rychlosti vmístění a tektonické deformace (např. de Saint Blanquat et al., 2011), a tudíž představují v mnoha případech výborné archivy tektonických procesů.

Kromě toho, velkou výzvu představují interpretace toku a vmístění magmatu z magnetických staveb kvůli možným komplikacím, pramenícím ze složité magnetické mineralogie. Například malé mikroskopické krystaly (nosiče susceptibility) se mohou stále otáčet ve zbytkové tavenině, zatímco okolní, na krystaly bohatá kaše magmatu je již uzamčena a nemůže se dále pohybovat. To může způsobit nesoulad mezi orientací magmatických a magnetických staveb, pravděpodobně způsobený pozdějšími jemnými změnami v deformačním režimu. Dále, feromagnetické minerály mohou vykazovat inverzní stavbu, mohou být alterovány, nebo nová zrna magnetitu mohou růst po vmístění a ovlivňovat tak primární AMS stavby. V neposlední řadě, teplo z magmatu vyvolává cirkulaci hydrotermálních fluid, což může významně ovlivnit magnetické stavby.

## CÍLE PRÁCE

Několik významných a stále ještě nevyřešených otázek vyvstává během studia záznamu magmatických staveb ve vulkano–plutonických komplexech magmatických oblouků, které mohou indikovat jak místní tok magmatu, tak i regionální tektonickou deformaci. Ambicí této doktorské teze je diskutovat a řešit následující otázky:

- Mohou magmatické stavby ve vulkanických horninách odhalit mechanismy toku a růstu různých lávových formací (např. lávový a popelový proud, dóm, peň, jehla). Jaká je role pre-existujících struktur, aktivní deformace na zlomech, či kolapsu kaldery během vulkanické činnosti? Je možné, že tyto struktury ovlivňují umístění láv a lze to odvodit ze staveb ve vulkanitech?
- Jaké jsou mechanismy konstrukce a související charakter toku a deformace magmatu v mělkých magmatických komorách pod velkými vulkány, a jsou srovnatelné s hlubšími plutony?
- Opravdu mělké intruze jako žíly, lakolity a subvulkanické plutony zaznamenávají jen deformaci během vmístění, nebo mohou také zaznamenávat informace o paleonapětí v magmatickém stavu?
- Jak magma ve svrchní kontinentální kůře interaguje s různými tektonickými režimy, jako jsou transtenze, transprese, nebo rotace litosférických bloků?
- Je možné z deformačního záznamu mělkých plutonů určit vektory pohybu litosférických desek a souvisejících paleonapětí?

## OBLASTI TERÉNNÍHO STUDIA

Výše nastíněné otázky výzkumu byly řešeny na příkladu čtyř vulkano–plutonických systémů v prostředí kontinentálního oblouku a zaobloukové oblasti. Společně, mohou být tyto případové studie považovány za vertikální řezy magmatickým systémem od povrchových lávových dómů až po hluboké plutony. Protože každá kapitola této doktorské práce obsahuje detailní informace o místní geologii, v následujícím textu jen krátce představuji jednotlivé studované oblasti.

(1) První dvě kapitoly se zabývají lávovými dómy a subvulkanickými magmatickými komorami štiavnického vulkano–plutonického systému z neogenního až kvartérního karpatsko–panonského regionu Západních Karpat. Tento komplex představuje erozní relikt miocenního kalderového stratovulkánu, který vznikl v extenzím režimu zaobloukové oblasti karpatského oblouku (Konečný et al. 1995, 2002; Lexa et al., 1999; Harangi et al. 2007; Chernyshev et al., 2013). Výrazný vertikální reliéf odkrývá téměř kompletní vertikální řez od podloží vulkánu, přes subvulkanické intruze a kruhový zlom až po nadložní vulkanické uloženiny. Takový odkryv tudíž poskytuje unikátní pohledy na dynamiku toku magmatu, vmístění a erupcí v případě velkých stratovulkánů.

(2) Středně křídová Minarets kaldera diskutovaná ve třetí kapitole je vulkano–plutonický komplex, zachovaný ve stropu kenozoického batolitu Sierra Nevada, jež je součástí severoamerické Kordillery v Kalifornii (Fiske and Tobisch, 1994). Tento komplex odkrývá regionálně deformované syn- a post- kalderové vulkanické produkty a

<3 km hluboký resurgentní Shellenbarger pluton, což dovoluje studovat pravděpodobně simultánní vulkanické a tektonické procesy.

(3) Kapitola 4 zkoumá plutony a jejich okolní horniny ve spodně-křídovém Wallowa batolitu v provincii Blue Mountains, který je také součástí severoamerické Kordillery, ale v severovýchodním Oregonu (např. Johnson et al., 2011). Batolit byl umístěn do orokliny v Blue Mountains přibližně v době kolize oceánských teránů Blue Mountains se severoamerickým kratonem. Wallowa batolit tedy může pomoci odhalit transpresní deformaci, kinematiku a časové vztahy mělkého plutonismu s kolizí teránů a oroklinálního ohybu.

(4) V poslední kapitole je prezentován výzkum starosedelského komplexu v centrální části Českého masivu. Tento komplex zahrnuje deformované granitoidy vápenato–alkalického složení ve stropu velkého magmatického oblouku, umístěného podél rozhraní dvou litosférických jednotek Českého masivu (např. Košler et al., 1993; Janoušek et al., 2000). Strukturní analýza komplexu pomohla diskutovat vliv tektonické deformace (transtENZE) na umístění hlubších granitoidních magmat.

## **METODIKA**

Předložená doktorská práce je rozdělena do tří částí. Úvod nastiňuje hlavní cíle práce a motivace pro výzkum a stručně shrnuje současný stav poznání. Hlavní část pak zahrnuje pět kapitol, z nichž tři jsou založeny na článcích již publikovaných v mezinárodních recenzovaných časopisech. Další dvě kapitoly představují články, které jsou v současné době předloženy do recenzního řízení. Poslední část pak shrnuje nejdůležitější výsledky práce.

Výzkum ve všech studovaných oblastech byl založen na kombinaci několika metod včetně terénního a strukturního mapování, které složily jako podklad pro cílené vzorkování anizotropie magnetické susceptibilitě (AMS; Hrouda, 1982; Tarling and Hrouda, 1993; Borradaile and Jackson, 2004, 2010). AMS vzorky byly změřeny v Laboratoři horninového magnetismu na Ústavu geologie a paleontologie, Karlovy University a měření bylo dále doplněno o detailní analýzu magnetické mineralogy. Kromě toho, bylo zkoumáno velké množství výbrusů pomocí optické a elektronové mikroskopie za účelem přesné charakteristiky minerálních asociací, vulkanických a magmatických textur a stupně jejich tektonické deformace. V neposlední řadě, třetí kapitola také obsahuje U-Th-Pb radiometrické datování metodou laserové ablace-indukčně vázané plazmy, hmotnostní spektrometrie (LA-ICP-MS) měřené na Universitě v Bergenu.

## **DISKUSE A ZÁVĚRY**

**Konkrétní studie: dynamika umístění magmatu v mělkých vulkano–plutonických systémech**

Magmatické stavby ve štíavnických lávových dómech (Dóm 1–3) a mělkých plutonech (diorit a granodiorit) jsou interpretovány jako záznam toku magmatu a deformace během růstu dómu a konstrukce magmatických komor.

(1) Prostorová a časová spjitost kolapsu kaldery a andezitových lávových dómů, umístěných podél kruhového zlomu, značí, že růst dómů byl řízen subsidencí dna kaldery. Dóm 1 je charakterizován jako 'lava coulee' (hybrid mezi lávovým proudem a dómem), který tekł dolů po ukloněném dnu 'trap-door' kaldery. Dóm 2 reprezentuje jednoduchý dóm, protažený paralelně s kruhovým zlomem, který se vyznačuje pouze krátkým transportem lávy, umístěným na ploché dno během 'piston' kolapsu. Magma do kompozičního Dómu 3 přitékalo pomocí několika lineárních puklin ve velkém úhlu ke kruhovému zlomu v postupně poklesávajícím dnu kalderového dna. Později byl tento dóm intrudován žilami, paralelními s kruhovým zlomem, které mohou reprezentovat potenciální zdroj magmatu pro mladší, dnes již oderodované lávové proudy a dómy. Předpokládám, že každý dóm zaznamenává krátké momenty jednotlivých módů kontinuálního vývoje kaldery od 'piston' (Dóm 2) přes 'trap-door' (Dóm 1) po 'piecemeal' kolaps (Dóm 3).

(2) Studie magnetických staveb dvou sub-vulkanických plutonů (diorit a granodiorit) odhalila odlišné mechanismy jejich konstrukce. Diorit byl umístěn jako strmý, ~ZSZ-VJV protažený peň. Rozměrnější granodiorit indikuje vrstevnatou architekturu a byl pravděpodobně umístěn ve dvou etapách. Za prvé, tenká ložní žíla intrudovala podél hlavního subhorizontálního rozhraní mezi místním geologickým podkladem a překryvem, což bylo následováno postupným poklesem frakturovaného dna plutonu podél ~SSV-JJZ zlomů ('piecemeal floor subsidence') v důsledku přetlaku magmatu. Tento proces otevřel prostor pro spodní vrstvu, což způsobilo růst původní žíly do tabulárního plutonu. Podle tohoto příkladu byl také vytvořen model toku magmatu a výsledných magmatických staveb pro plutony rostoucí různými módy subsidence dna.

### Konkrétní studie: vulkanismus, plutonismus a tektonická deformace v kontinentálních obloucích

(1) Středně-křídová Minarets kaldera v magmatickém oblouku Sierra Nevada je výborným příkladem interakce mezi vulkanismem, plutonismem a tektonickou deformací. Původní vulkán vznikl několika plinijskými erupcemi ignimbritů, které byly následovány kolapsem kaldery doložené umístěním mocné kolapsové megabrekcie a post-kolapsové ignimbritů. Celá sekvence pak byla deformována podél duktilní transpresní střížné zóny a intrudována velmi mělkým, resurgentním granitovým plutonem Shellenbarger v jádru kaldery. Magmatické stavby v plutonu dále zaznamenávají regionální pravostrannou transpresi, která je interpretována jako důsledek šikmé konvergence litosférických desek.

Magmatické a metamorfní stavby v plutonu a jeho strukturní aureole, respektive, zaznamenávají regionální transpresní deformaci. Stejná deformace je pak dokumentována i z několika dalších svrchně-křídových syntektonických plutonů v pohorí Sierra Nevada, které ale indikují různé hlavní směry protažení: téměř vertikální magmatické protažení v plutonech stářím ~102–86 Ma a subhorizontální pozdně magmatické až subsolidové protažení v plutonech stářím ~87–86 Ma. Předpokládám, že rotace hlavního směru protažení okolo 87–86 Ma značí kontinuální změnu v kinematice pohybu litosférických desek a z toho vyplývající změnu v režimu deformace

magmatického oblouku. Tato deformace přechází z transprese dominované čistým stříhem do transprese dominované jednoduchým stříhem, což indikuje zvyšující se šikmost konvergence severoamerické a farallonské desky.

(2) Ve Wallowa batolitu v severovýchodní části Oregonu, struktury v okolních horninách a magmatické až subsolidové stavby v plutonech Pole Bridge, Hurricane Divide, and Craig Mountain zaznamenávají tři fáze progresivní regionální deformace provincie Blue Mountains během spodní křídy (~140–126 Ma). Tyto stavby indikují nejstarší ~SV–JZ maximální zkrácení způsobené amalgamací superteránu Blue Mountains k severoamerickému kontinentu. Tato deformace se později změnila na ~SSV–JJZ orientované zkrácení spojené s vertikálním protažením v důsledku pokračující kolize superteránu a severoamerického kontinentu okolo 135–128 Ma. Severní část tohoto superteránu se potom ‘uzamkla’, což znemožnilo její další deformaci a vyústilo v reorientaci maximálního zkrácení do směru ~SSZ–JJV a rotaci jižní, deformovatelné části superteránu podle vertikální osy okolo 126 Ma.

(3) Ve svrchně-devonském starosedelském komplexu v centrální části Českého masivu, granodiority a tonality byly vmístěny jako subhorizontální žilný komplex do aktivní transtenzní zóny. Charakter této deformace je odvozen ze subhorizontálních magmatických až subsolidových foliací, ~SV–JZ lineací a prolátního tvaru deformačního elipsoidu v granitoidech i konkordantních staveb v okolních horninách. Žíly magmatu zde pronikaly do okolní horniny mechanismem ‘magma wedging’. Žíly dále vertikálně expandovaly až došlo ke stabilnímu toku magmatu, následován vertikálním kolapsem po zastavení přítoku magmatu a transtenzní deformaci. Vmístění žil a jejich postupná deformace zaznamenávají syn-konvergentní levostrannou transtenzi během iniciálního stadia Variského orogénu. Tato zatím ‘záhadná’ deformace se pravděpodobně odehrála podél zadní části vertikálně a laterálně extrudujícího svrchně korového klínu, reprezentovaného tepelsko–barrandienskou jednotkou.

## Hlavní implikace

Tato práce dokumentuje, jak tektonické predispozice (zlomy, hlavní geologická rozhraní) a aktivní deformace na zlomech (kolaps kaldery) ve vulkano–plutonických systémech může kontrolovat vmístění vulkanických a plutonických těles, jako například dynamika růstu a konstrukce lávových dómů a subvulkanických magmatických komor. Dále, na rozdíl od teoretických modelů, bylo prokázáno, že dokonce i velmi mělké intruze malého rozsahu jsou schopny zaznamenat i jemnou tektonickou deformaci v magmatických stavu. Přestože magmatické stavby v plutonech zachovávají pouze momenty okamžitého přírůstku celkové deformace, podrobná analýza magmatických staveb syntektonických plutonů společně s přesnými radiometrickým datováním představuje mocným nástroj schopný rozplétat složité deformační historie (transprese, transtenze, vrásnění krustálního měřítká a rotace litosférických bloků) v regionálním měřítku po dlouhé časové intervaly. Závěrem, je ukázáno, že magmatické stavby v plutonech mohou být použity k dešifrování kinematiky deskové konvergence nebo divergence a změn v jejich relativních pohybech.

## REFERENCES / POUŽITÁ LITERATURA

- Acocella, V., Funicello, F., 2010. Kinematic setting and structural control of arc volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.* 289, 43–53.
- Annen, C., Blundy, J.D., Sparks, R.S.J., 2006. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. *J. Petrol.* 47, 505–539.
- Bachmann, O., Bergantz, G.W., 2004. On the Origin of Crystal-poor Rhyolites: Extracted from Batholithic Crystal Mushes. *J. Petrol.* 45, 1565–1582.
- Bachmann, O., Bergantz, G.W., 2008. The magma reservoirs that feed supereruptions. *Elements* 4, 17–21.
- Bachmann, O., Miller, C.F., de Silva, S.L., 2007. The volcanic–plutonic connection as a stage for understanding crustal magmatism. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 167, 1–23.
- Benn, K., 2004. Late Archaean Kenogamissi complex, Abitibi Subprovince, Ontario, Canada: doming, folding and deformation-assisted melt remobilisation during syntectonic batholith emplacement: Earth and Environmental Science Trans. Roy. Soc. Edinb. Earth. Sci. 95, 297–307.
- Benn, K., Paterson, S.R., Lund, S.P., Pignotta, G.S., and Kruse, S., 2001. Magmatic fabrics in batholiths as markers of regional strains and plate kinematics: example of the Cretaceous Mt. Stuart batholith. *Phys. Chem. Earth, Part A Solid Earth Geod.* 26, 343–354.
- Borradaile, G.J., Jackson, M., 2004. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS): magnetic petrofabrics of deformed rocks. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 238, pp. 299–360.
- Borradaile, G.J., Jackson, M., 2010. Structural geology, petrofabrics and magnetic fabrics (AMS, AARM, AIRM). *J. Struct. Geol.* 32, 1519–1551.
- Brown, M., 1994. The generation, segregation, ascent and emplacement of granite magma: the migmatite-to-crustally-derived granite connection in thickened orogens. *Earth-Science Rev.* 36, 83–130.
- Brown, M., 2007. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: mechanisms and consequences. *J. Geol. Soc.* 164, 709–730.
- Brown, M., 2013. Granite: From genesis to emplacement. *Geol. Soc. Am. Bull.* 125, 1079–1113.
- Brown, M., Solar, G.S., 1998. Granite ascent and emplacement during contractional deformation in convergent orogens. *J. Struct. Geol.* 9–10, 1365–1393.
- Cañón-Tapia, E., Walker, G.P.L., Herrero-Bervera, E., 1996. The internal structure of lava flows—insights measurements I: Near-vent a'a from AMS. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 70, 21–36
- Cañón-Tapia, E., Walker, G.P.L., Herrero-Bervera, E., 1997. The internal structure of lava flows—insights from AMS measurements II: Hawaiian pahoehoe, toothpaste lava and a'a. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 76, 19–46.
- Cao, W., Paterson, S., Memeti, V., Mundil, R., Anderson, J.L., Schmidt, K., 2015. Tracking paleodeformation fields in the Mesozoic central Sierra Nevada arc: Implications for intra-arc cyclic deformation and arc tempos. *Lithosphere*, 1–25.
- Cartwright, J., Hansen, D.M., 2006. Magma transport through the crust via interconnected sill complexes. *Geology* 34, 929–932.
- Chernyshev, I.V., Konečný, V., Lexa, J., Kovalenker, V.A., Jeleň, S., Lebedev, V.A., Goltsman, Y.V., 2013. K-Ar and Rb-Sr geochronology and evolution of the Štiavnica Stratovolcano (Central Slovakia). *Geol. Carpathica* 64, 1–25.
- Clemens, J.D., Mawer, C.K., 1992. Granitic magma transport by fracture propagation. *Tectonics* 204, 339–360.
- Collins, W.J., Sawyer, E.W., 1996. Pervasive granitoid magma transfer through the lower-middle crust during non-coaxial compressional deformation. *J. Metamorph. Geol.* 14, 565–579.
- Crawford, M.L., Klepeis, K.A., Gehrels, G., Isachsen, C., 1999. Batholith emplacement at mid-crustal levels and its exhumation within an obliquely convergent margin. *Tectonophysics* 312, 57–78.
- D'Lemos, R.S., Brown, M., Strachan, R. A., 1992. Granite magma generation, ascent and emplacement within a transpressional orogen. *J. Geol. Soc. London.* 149, 487–490.
- DeCelles, P.G., Ducea, M.N., Kapp, P., Zandt, G., 2009. Cyclicity in Cordilleran orogenic systems. *Nat. Geosci* 2, 251–257.
- DeCelles, P.G., Zandt, G., Beck, S.L., Currie, C.A., Ducea, M.N., Kapp, P., Gehrels, G.E., Carrapa, B., Quade, J., Schoenbohm, L.M., 2014. Cyclical orogenic processes in the Cenozoic central Andes: *Geol. Soc. Am. Memoirs* 212.



- de Saint Blanquat, M., Horsman, E., Habert, G., Morgan, S., Vanderhaeghe, O., Law, R., Tikoff, B., 2011. Multiscale magmatic cyclicality, duration of pluton construction, and the paradoxical relationship between tectonism and plutonism in continental arcs. *Tectonophysics*, 500, 20–33.
- Ducea, M.N., Barton, M.D., 2007. Igniting flare-up events in Cordilleran arcs. *Geology* 35, 1047–1050.
- Féménias, O., Diot, H., Berza, T., Gauffriau, A., Demaiffe, D. 2004. Asymmetrical to symmetrical magnetic fabric of dikes: Paleo-flow orientations and Paleo-stresses recorded on feeder-bodies from the Motru Dike Swarm (Romania). *J. Struct. Geol.* 26, 1401–1418.
- Fiske, R., and Tobisch, O., 1994. Middle Cretaceous ash-flow tuff and caldera-collapse deposit in the Minarets caldera, east-central Sierra Nevada, California: *Geol. Soc. Am. Bull.* 205, 582–593.
- Harangi, S., Downes, H., Thirlwall, M., Gmeling, K., 2007. Geochemistry, petrogenesis and geodynamic relationships of Miocene calc-alkaline volcanic rocks in the Western Carpathian Arc, Eastern Central Europe. *J. Petrol.* 48, 2261–2287.
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.* 5, 37–82.
- Hutton, D.H.W., 1988. Granite emplacement mechanisms and tectonic controls: inferences from deformation studies. *Earth Environ. Sci. Trans. R. Soc. Edinburgh* 79, 245–255.
- Janoušek, V., Bowes, D.R., Rogers, G., Farrow, C.M., Jelínek, E., 2000. Modelling diverse processes in the petrogenesis of a composite batholith: the Central Bohemian Pluton, Central European Hercynides. *J. Petrol.* 41, 511–543.
- Johnson, K., Schwartz, J.J., Wooden, J.L., O’Driscoll, L.J., Jeffcoat, R.C., 2011. The Willowa batholith: new Pb/U (SHRIMP-RG) ages place constraints on arc magmatism and crustal thickening in the Blue Mountains Province, NE Oregon. *Geol. Soc. Am. Abstracts with Programs* 43, 5.
- Konečný, P., Lexa, J., Hostrličová, V., 1995. The Central Slovakia Neogene volcanic field. *Acta Vulcanol.* 7, 63–78.
- Konečný, V., Kováč, M., Lexa, J., Šefara, J., Šefara, J., Konečný, V., Kováč, M., Šefara, J., 2002. Neogene evolution of the Carpatho-Pannonian region: an interplay of subduction and backarc diapiric uprise in the mantle. *EGU Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.* 1, 105–123.
- Košler, J., Aftalion, M., Bowes, D.R., 1993. Mid-late Devonian plutonic activity in the Bohemian Massif: U–Pb zircon isotopic evidence from the Staré Sedlo and Mirotice gneiss complexes, Czech Republic. *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.* 9, 417–431.
- Lexa, J., Štohl, J., Konečný, V., 1999. The Banská Štiavnica ore district: relationship between metallogenetic processes and the geological evolution of a stratovolcano. *Miner. Depos.* 34, 639–654.
- Lipman, P.W., 1984. The roots of ash flow calderas in western North America: Windows into the tops of granitic batholiths. *J. Geophys. Res.* 89, 8801–8840.
- Lipman, P.W., Bachmann, O., 2015. Ignimbrites to batholiths: Integrating perspectives from geological, geophysical, and geochronological data. *Geosphere* 11, 705–743.
- Loock, S., Diot, H., Van Wyk de Vries, B., Launeau, P., Merle, O., Vadeboin, F., Petronis, M.S., 2008. Lava flow internal structure found from AMS and textural data: An example in methodology from the Chaîne des Puys, France. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 177, 1092–1104.
- Miller, R.B., Paterson, S.R., 2001. Construction of mid-crustal sheeted plutons: Examples from the North Cascades, Washington. *Geol. Soc. Am. Bull.* 113, 1423–1442.
- Milord, I., Sawyer, E.W., Brown, M., 2001. Formation of diatexite migmatite and granite magma during anatexis of semi-pelitic metasedimentary rocks: An example from St. Malo, France. *J. Petrol.* 42, 487–505.
- Ort, M.H., Orsi, G., Pappalardo, L., Fisher, R.V., 2003. Anisotropy of magnetic susceptibility studies of depositional processes in the Campanian Ignimbrite, Italy. *Bull. Volcanol.* 65, 55–72.
- Ort, M.H., Porreca, M., Geissman, J.W., Aquila, L., 2015. The use of palaeomagnetism and rock magnetism to understand volcanic processes: introduction. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 396, pp. 1–11.
- Palmer, H.C., MacDonald, W.D., Gromme, C.S., Ellwood, B.B., 1996. Magnetic properties and emplacement of the Bishop tuff, California. *Bull. Volcanol.* 58, 101–116.
- Paterson, S.R., Ducea, M.N., 2015. Arc Magmatic Tempos: Gathering the Evidence. *Elements* 11, 91–98.
- Paterson, S.R., Vernon, R.H., Tobisch, O.T., 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. *J. Struct. Geol.* 11, 349–363.
- Paterson, S.R., Fowler, T.K., Schmidt, K.L., Yoshinobu, A.S., Yuan, E.S., Miller, R.B., 1998. Interpreting magmatic fabric patterns in plutons. *Lithos* 44, 53–82.

- Pitcher, S.W., Berger, A.R., 1972. *Geology of Donegal: a study of granite emplacement and unroofing*. Regional Geology Series, John Wiley & Sons Inc, New York, pp. 435.
- Petford, N., 2003. Rheology of granitic magmas during ascent and emplacement. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31, 399–427.
- Petford, N., Kerr, R., Lister, J., 1993. Dike transport of granitoid magmas. *Geology* 21, 845–848.
- Petford, N., Cruden, A.R., McCaffrey, K.J., Vigneresse, J.L., 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature* 408, 669–73.
- Petronis, M.S., Delcamp, A., van Wyk de Vries, B., 2013. Magma emplacement into the Lemptégy scoria cone (Chaîne Des Puys, France) explored with structural, anisotropy of magnetic susceptibility, and paleomagnetic data. *Bull. Volcanol.* 75, 753.
- Rosenberg, C.L., 2004. Shear zones and magma ascent: A model based on a review of the Tertiary magmatism in the Alps. *Tectonics* 23. doi:10.1029/2003TC001526
- Tarling, D., Hrouda, F., 1993. *Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman & Hall.
- Tatsumi, Y., 2005. The subduction factory: How it operates in the evolving Earth. *GSA Today* 15, 4–10.
- Tatsumi, Y., Kogiso, T., 2003. The subduction factory: its role in the evolution of the Earth's crust and mantle. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 219, 55–80.
- Vernon, R.H., 2000. Review of Microstructural Evidence of Magmatic and Solid-State Flow. *Vis. Geosci.* 5, 1–23.
- Vernon, R.H., and Paterson, S.R., 2006. Mesoscopic structures resulting from crystal accumulation and melt movement in granites. *Trans. Roy. Soc. Edinb. Earth Sci.* 97, 369–381.
- Vernon, R.H., Johnson, S.E., Melis, E.A., 2004. Emplacement-related microstructures in the margin of a deformed pluton: the San José tonalite, Baja California, México. *J. Struct. Geol.* 26, 1867–1884.
- Vigneresse, J.L., 1995a. Control of granite emplacement by regional deformation. *Tectonophysics* 249, 173–186.
- Vigneresse, J.L., 1995b. Crustal regime of deformation and ascent of granitic magma. *Tectonophysics* 249, 187–202.
- Vigneresse, J.L., Clemens, J.D., 2000. Granitic magma ascent and emplacement: neither diapirism nor neutral buoyancy. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 174, 1–19.

## **Curriculum vitae**

### **FILIP TOMEK**

Born 21 January 1987, in Prague, Czech Republic

Contact: filip.tomek@gmail.com

#### ***Education***

2011 Master degree in geology, Faculty of Science, Charles University in Prague

2010 Master study stay at Université Blaise Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont Ferrand, France (ERASMUS)

2009 Bachelor degree in geology, Faculty of Science, Charles University in Prague

2006 Secondary education, Gymnasium Voděradská, Prague

#### ***Theses***

The Late Devonian to early Carboniferous kinematic evolution of the Teplá–Barrandian/Moldanubian boundary; diploma thesis, supervisor Jiří Žák.

Devonian magmatic activity along the Teplá–Barrandian/ Moldanubian boundary; bachelor thesis, supervisor Jiří Žák.

#### ***Professional experiences***

2011 International course on collapse calderas, IAVCEI, Bolsena

2011 Introduction to physical volcanology and volcanic textures, TUB Freiberg

#### ***Awards***

Radek Melka Price (best paper of the CETEG 2015 meeting in Kadaň, Czech Republic)

#### ***Research projects***

2015–2017 Post-collisional plutonism in the south-western Bohemian Massif (funded by grant of the Austrian Science Fund No. I1993 to K.Verner)

2014 Magma flow and variation in deformation mechanism through dykes of Roztok intrusive centre (funded by internal grant of the Czech Academy of Sciences to F. Tomek)

2012–2014 Calderas as indicators of thermal-mechanical evolution of subvolcanic magma chambers (funded by grant of the Grant Agency of the Czech Republic No. P210/12/1385 to J. Žák)

## *Seznam publikací / publications*

### Manuscript under review

- Tomek F, Žák J, Holub FV, Chlupáčová M, Verner K (in review) Growth of intra-caldera lava domes controlled by various modes of caldera collapse, the Štiavica volcano-plutonic complex, Western Carpathians. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*
- Tomek F, Žák J, Verner K, Holub FV, Sláma J, Paterson SR, Memeti V (in review) Volcano-tectonic interactions, crustal strain, and plate kinematics during Late Cretaceous shutdown of the Sierra Nevada magmatic arc, California. *Geological Society of America Bulletin*

### Publications

- Žák J, Verner K, Tomek F, Holub FV, Johnson K, Schwartz JJ (2015) Simultaneous batholith emplacement, terrane/continent collision, and oroclinal bending in the Blue Mountains Province, North American Cordillera. **Tectonics** 34, in press
- Tomek F, Žák J, Chadima M (2015) Granitic magma emplacement and deformation during early-orogenic syn-convergent transtension: the Staré Sedlo complex, Bohemian Massif. **Journal of Geodynamics** 87: 50–66
- Tomek F, Žák J, Chadima M (2014) Magma flow paths and strain patterns in magma chambers growing by floor subsidence: a model based on magnetic fabric study of shallow-level plutons in the Štiavica volcano-plutonic complex, Western Carpathians. **Bulletin of Volcanology** 76, Article No. 87
- Žák J, Verner K, Janoušek V, Holub FV, Kachlík V, Finger F, Hajná J, Tomek F, Vondrovic L, Trubač J (2014) A plate-kinematic model for the assembly of the Bohemian Massif constrained by structural relations around granitoid plutons. In: Schulmann K, Oggiano G, Lardeaux JM, Janoušek V, Martínez Catalán JR (Eds), *The Variscan orogeny: extent, timescale and the formation of the European crust*. **Geological Society, London, Special Publications** 405: 169–196

### Conference abstracts and proceedings

- Tomek F, Žák J, Verner K, Holub FV, Sláma J, Memeti V, Paterson SR (2015) Simultaneous collapse, resurgence, and deformation of the Minarets caldera with implications for Late Cretaceous strain variations in the Sierra Nevada, California. *Goldschmidt 2015*. (Poster)
- Tomek F, Žák J, Chadima M, Holub FV, Verner K. (2015) Magnetic fabrics as markers of emplacement strain in magma chambers and associated lava domes, Štiavica volcano-plutonic complex, Western Carpathians. *CETEG meeting in Kadaň, Czech Republic*. (Poster)
- Tomek F, Žák J, Verner K (2014) Magnetic fabric of andesite lava domes extruded along a caldera ring fault, the Štiavica volcano-plutonic complex, Western Carpathians. *GeoFrankfurt, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 85, 509. (Lecture)
- Tomek F, Žák J (2014) On the emplacement of granitic sheets in transtension and scaling of magmatic and tectonic strain rates. *Volcanic and Magmatic Studies Group, Edinburgh*. (Lecture)
- Tomek F, Žák J (2013) Magnetic fabrics in sub-caldera plutons recording magma ascent and fault-caldera interactions, the Štiavica volcano-plutonic complex, Western Carpathians. *Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013 General Assembly*. (Lecture)